ARTÍCULO ACEPTADO / ACCEPTED PAPER

Este artículo ha sido aceptado luego de una revisión por pares completa, ha pasado por revisión de estilo pero aún no por maquetación y paginación. Por favor, cite este artículo como:

This article has been accepted for publication and undergone full peer review, it has been through copyediting, but not through typesetting and pagination. Please cite this article as:

Parra, R. (2017) Efecto Fin de Semana en la calidad del aire de la ciudad de Cuenca, Ecuador. ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, http://doi.org/10.18272/aci.v9i15.291

Efecto Fin de Semana en la calidad del aire de la ciudad de Cuenca, Ecuador

René Parra
Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Ciencias e Ingenierías, Instituto de Simulación Computacional, Quito 170901, Ecuador
Autor para correspondencia/Corresponding author, e-mail: rrparra@usfq.edu.ec

Editado por/Edited by: Fabricio Yépez, PhD
Recibido/Received: 14/04/2016. Aceptado/Accepted: 17/02/2017
Publicado en línea/Published online: 09/12/2017

DOI: http://doi.org/10.18272/aci.v9i15.291

Weekend Effect in the Air Quality of the City of Cuenca - Ecuador

Abstract

The Weekend Effect (WE) is a phenomenon that occurs in some urban areas, characterized by increased concentrations of O_3 despite of the decreasing in emissions of its precursors (NO_x and VOC) during weekend days, in comparison to weekdays. Study of WE is relevant for understanding the behavior of pollutants, and hence, for air quality control. In this study, we analyzed hourly records of the period 2013–2015, from the air quality station in the historic center of the city of Cuenca, Ecuador. For each year, 3 mean-daily profiles were obtained for CO, NO_2, $PM_{2.5}$ and O_3, corresponding to weekdays, Saturdays and Sundays. CO, NO_2 and $PM_{2.5}$ profiles declined on Saturdays and Sundays, in comparison to weekdays. However, O_3 profiles showed equal or higher concentrations on Saturdays and Sundays. Mean increase of the maximum O_3 8–h mean concentrations of Sundays, in comparison to weekdays, ranged between 8.6 and 15.8%. These results suggest the presence of WE around in the historic center of Cuenca, zone where probably there is a VOC-limited regime for photochemical O_3 production.

Keywords: Ozone, VOC-limited regime, NO_x-limited regime, air quality.

Resumen

El Efecto Fin de Semana (EFS) es un fenómeno que suele presentarse en algunas zonas urbanas, caracterizado por un incremento de las concentraciones de O_3 durante los fines de semana, aunque hay una reducción de las emisiones de sus precursores (COV y NO_x) en relación con los días laborables. La identificación y estudio del EFS es relevante a fin de entender el comportamiento de los contaminantes del aire y como elemento fundamental para el control de la contaminación atmosférica. En este estudio, se analizaron los registros horarios del periodo 2013–2015 de la estación de calidad de aire localizada en el centro histórico de la ciudad de Cuenca, Ecuador. Para cada año, se generaron 3 perfiles promedio de las concentraciones horarias de CO, NO_2, $MP_{2.5}$ y O_3 para los días laborables, sábados y domingos. Los perfiles de CO, NO_2 y $MP_{2.5}$ presentaron concentraciones menores durante los sábados y domingos, con respecto a los días laborables. Sin embargo, los perfiles de O_3 presentaron concentraciones iguales o mayores durante los sábados y domingos. El incremento medio de las concentraciones máximas octohorarias de O_3 de los domingos, con respecto al promedio de los días laborables, varió entre 8,6 y

15,8%. Estos resultados indican potencialmente la presencia del EFS en el centro histórico de la ciudad de Cuenca, zona en la que probablemente hay un régimen limitado por COV para la generación de O_3.

Palabras Clave: Ozono, Régimen limitado por COV, Régimen limitado por NO_x, calidad del aire.

El ozono troposférico (O_3) es un contaminante secundario del aire, cuyas concentraciones se incrementan por las reacciones de los óxidos de nitrógeno (NO_x = NO [óxido nítrico] + NO_2 [dióxido de nitrógeno]) y de los compuestos orgánicos volátiles (COV), bajo la influencia de la radiación solar. Las concentraciones de O_3 en la tropósfera de fondo varían en función de las siguientes reacciones [1]:

$$NO_2 + \text{radiación solar} \rightarrow NO + O \quad (1)$$
$$O + O_2 \rightarrow O_3 \quad (2)$$
$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2 \quad (3)$$

El NO_2 se destruye por acción de la radiación solar, en NO y O elemental (reacción 1). El átomo de O se combina con el O_2 para formar O_3 (reacción 2). En ausencia de COV, el O_3 de la reacción (2) se combina con el NO, para regenerar NO_2 y O_2 (reacción 3). Cuando hay emisiones de COV, estos compuestos se oxidan a radicales libres (RO_2^*), que luego reaccionan con el NO para producir NO_2 (reacción 4), sin el consumo, y como consecuencia, produciendo la acumulación de O_3.

$$RO_2^* + NO \rightarrow NO_2 + RO^* \quad (4)$$

La relación entre los COV, NO_x y O_3 es compleja. La Figura 1 presenta las concentraciones de O_3 resultantes a partir de concentraciones iniciales diferentes de COV y NO_x. El incremento de las emisiones de NO_x promueve la generación de O_3 cuando hay abundantes cantidades de COV, pero restringe o incluso reduce la generación de O_3 cuando la presencia de COV es escasa. En una parcela de aire, la abundancia relativa entre COV y NO_x (expresada en términos de la relación COV/NO_x) determina si los NO_x promueven o inhiben la generación de O_3 [2]. Cuando la relación COV/NO_x es alta (8 o mayor), los NO_x limitan la formación de O_3 (Régimen Limitado por NO_x, Fig. 1). Cuando la relación COV/NOx es baja (8 o menor), los COV limitan la producción de O_3 (Régimen Limitado por COV, Fig. 1). Típicamente en las zonas urbanas con alto tráfico vehicular, las relaciones VOC/NO_x implican regímenes limitados por COV [3, 4]. A más de las emisiones en la atmósfera urbana, en la dinámica del O_3 participan otros componentes como las concentraciones de contorno, el transporte advectivo, la dispersión y otras reacciones fotoquímicas.

El Efecto Fin de Semana (EFS) es un fenómeno que suele presentarse en algunas zonas urbanas, caracterizado por un incremento de las concentraciones de O_3, a pesar de que hay una reducción de las emisiones de sus precursores (COV y NO_x), en relación a los días laborables. El EFS se reportó inicialmente en New York y Baltimore en la década de los 1970s [5, 6], y desde entonces ha sido identificado en otras ciudades de los Estados Unidos y Europa [7, 8, 9, 10]. En un estudio del EFS en California se plantearon siete hipótesis al respecto [2]:

1. Reducción de las emisiones de NO_x: Típicamente en los sábados y domingos se reduce la intensidad de tráfico vehicular en las zonas urbanas. Por lo tanto, también se reducen las emisiones de NO_x y con ello se pueden incrementar las concentraciones de O_3, al tratarse de un régimen limitado por COV (Fig. 1).
2. Desplazamiento de las emisiones de NO_x: Durante las mañanas de los fines de semana, las emisiones de NO_x se producen más tarde, en comparación con los días laborables, por lo que las emisiones del fin de

Parra, R. (2017) Efecto Fin de Semana en la calidad del aire de la ciudad de Cuenca, Ecuador. ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, http://doi.org/10.18272/aci.v9i15.291

semana entran directamente en un sistema fotosintéticamente más activo, y por ello, generan O_3 de manera más eficiente.

3. Incremento de emisiones durante las noches de viernes y sábados: Típicamente hay mayor tráfico vehicular durante las noches de los viernes y sábados, en comparación con otros días. Estas emisiones nocturnas participan al día siguiente en la formación de O_3.
4. Descenso de contaminantes de capa remanente alta: Durante las noches, la parte baja de atmósfera en contacto con la superficie se vuelve estable (impide los movimientos verticales de las masas de aire) por el descenso de temperatura; en tanto que la capa alta permanece en condiciones inestables (promueve los movimientos verticales) o neutras (no impide pero tampoco promueve los movimientos verticales). De este modo, la capa alta permanece como una reserva remanente nocturna de contaminantes, que desciende a superficie al día siguiente, cuando se calienta la parte baja de la atmósfera y desaparece la estabilidad atmosférica. El descenso de O_3 de esta capa remanente podría tener mayor influencia durante los fines de semana, en comparación con los días laborables.
5. Incremento de emisiones durante los fines de semana: Se produce una mayor cantidad de O_3 durante los fines de semana debido a que hay mayores emisiones de COV y NO_x.
6. Aerosoles y Radiación Ultravioleta (RU): Las emisiones de hollín (carbono elemental) y de otras partículas es mayor durante los días laborables, en comparación con los fines de semana, en razón del descenso del tráfico vehicular. Debido a que el hollín absorbe la RU, sus menores concentraciones durante los fines de semana absorben menores cantidades de RU, por lo que hay niveles más altos de radiación solar en superficie para la generación de O_3.
7. Destrucción de O_3 en superficie: Se destruye una menor cantidad de O_3 durante los fines de semana, en razón de que hay menores emisiones de NO (reacción 3).

El estudio de la contribución de las hipótesis del EFS constituye un elemento relevante para entender el comportamiento de los contaminantes, como principio básico para el control de la contaminación atmosférica. A fin de identificar la ocurrencia del EFS, se analizaron los registros de la calidad del aire en la ciudad de Cuenca, localizada en la región Sierra, al sur del Ecuador (Fig. 2).

Cuenca es la capital del cantón Cuenca y se localiza a una cota media de 2550 msnm. El cantón Cuenca presenta una topografía compleja, un porcentaje importante del territorio del cantón se emplaza sobre la Cordillera Occidental de los Andes, con cotas que superan los 4000 msnm. La red de monitoreo de la calidad del aire de Cuenca opera desde el año 2008. En su inicio estuvo conformada por estaciones con monitoreo pasivo y semiautomáticas de material particulado. Desde junio del 2012 entró en operación una estación automática (Estación Mun) instalada en la zona del centro histórico de la ciudad (Fig. 2), que registra en tiempo real las concentraciones de monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), NO_2, O_3 y material particulado fino (diámetro aerodinámico menor a 2.5 micras, $MP_{2.5}$). El tráfico vehicular es la fuente más importante de emisiones de contaminantes del aire en el cantón Cuenca. De acuerdo al inventario del año 2011, esta fuente contribuyó con el 92% de las emisiones de CO, 76% de NO_x, 43% de $MP_{2.5}$, 34% de COV y 30% de SO_2 [11]. Las emisiones del tráfico vehicular se localizan principalmente en la zona urbana de Cuenca. En el periodo 2013–2015, la concentración establecida para el O_3 en la Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire (100 $\mu g/m^3$) se superó en 15 días (Tabla 1), de los cuales 9 excedencias corresponden a días laborables y 6 a días de fin de semana.

Se procesaron los registros horarios del periodo 2013–2015 de la Estación Mun (Fig. 2) de la ciudad de Cuenca. Para cada año se generaron 3 perfiles promedio de las concentraciones horarias de CO, NO_2, $MP_{2.5}$ y O_3 para los días laborables, sábados y domingos. Adicionalmente se obtuvieron las concentraciones octohorarias máximas de O_3, con el fin de cuantificar los respectivos porcentajes de variación por semana, entre los sábados y domingos con

respecto a los días laborables. Las concentraciones octohorarias de O_3 se cuantificaron con el promedio de las concentraciones entre las 10h00 y 17h00, considerando que típicamente en este periodo las concentraciones son mayores en relación a las demás horas del día. Este enfoque es similar al utilizado en el estudio del EFS en Santiago de Chile [15], y en la identificación de ESF en la zona urbana de Quito [16].

Los perfiles de CO, NO_2 y $MP_{2.5}$ en los años 2013–2015 presentan concentraciones menores durante los sábados y domingos, con respecto a los días laborables. La Figura 3 presenta los perfiles diarios de CO, NO_2 y $MP_{2.5}$ para el año 2015. Los perfiles de los años 2013 y 2014 presentan configuraciones similares. Los perfiles de O_3 presentan concentraciones iguales o mayores durante los sábados y domingos (Fig. 4). Durante el período 2013–2015, el porcentaje medio de incremento de las concentraciones máximas octohorarias de los sábados y domingos, con respecto al promedio de los días laborables, varió entre 4,8–11,8% y 8,6–15,8% respectivamente (Fig. 5). Estos resultados indican potencialmente la presencia del EFS en el Centro Histórico de la ciudad de Cuenca, especialmente durante los domingos. El rango de variación media de la concentración octohoraria máxima de los domingos (8,6–15.8%) es similar a la variación obtenida para el Centro Histórico de Quito (11,7–18,4%), zona para la cual se ha identificado el EFS [16].

De acuerdo al inventario de emisiones del año 2011 [11], en el cantón Cuenca circularon alrededor de 126 000 vehículos, de los cuales el 89% corresponden a vehículos a gasolina y el restante 11% a vehículos a diésel. Se estimó que en el año 2011, el tráfico vehicular emitió 37.9 kt de CO, 8.2 kt de NO_x, 4.7 kt de COV y 0.4 kt de $MP_{2.5}$. De estas emisiones, a los vehículos a gasolina se les atribuye el 83% de las emisiones de CO y 75% de COV. Los vehículos a diésel, aunque en número sólo representan el 11% del parque vehicular, se les atribuye el 95% de las emisiones de $MP_{2.5}$ del tráfico vehicular y 67% de las emisiones de NO_x. De los vehículos a diésel, los vehículos pesados (44% del total de vehículos a diésel), las camionetas-furgonetas (34%) y los buses (11%), son los más numerosos. Estos vehículos reducen de manera importante su actividad durante los fines de semana, especialmente los domingos. Por ello, se producen reducciones importantes en las emisiones de NO_x y $MP_{2.5}$. De los vehículos a gasolina, los automóviles (40% del total de vehículos a gasolina), los jeeps (26%) y las camionetas - furgonetas (24%) son los más numerosos. La reducción de la circulación de estos vehículos durante los fines de semana implica una reducción, principalmente de las emisiones de CO y COV.

La reducción de las emisiones de CO, NO_x and $MP_{2.5}$ durante los fines de semana, se refleja claramente en los perfiles de la Fig. 3. Esta información sugiere que la primera hipótesis del EFS (reducción de las emisiones de NO_x) podría explicar que en promedio, las concentraciones de O_3 se mantengan o sean mayores en fines de semana, en comparación con los días laborables. Ello indica que posiblemente en la zona de influencia de la Estación Mun hay un régimen limitado por COV para la generación de O_3. La reducción de las emisiones de NO_x durante los fines de semana podría promover el incremento de O_3 en el Centro Histórico de Cuenca.

La reducción de las emisiones de $MP_{2.5}$ sugiere que la hipótesis 6 (aerosoles y radiación ultravioleta) también podría ser relevante para explicar las concentraciones de O_3 durante los fines de semana. En razón de las menores emisiones de material particulado hay niveles más altos de radiación solar en superficie para la generación de O_3. Adicionalmente, la segunda (desplazamiento de las emisiones de NO_x) y séptima hipótesis (destrucción de O_3 en superficie) podrían contribuir en el EFS en Cuenca.

La participación de la tercera (incremento de emisiones durante las noches de viernes y sábados) y cuarta hipótesis (descenso de contaminantes de capa remanente alta) parece menos relevante. Finalmente, se descarta la participación de la hipótesis 5 (incremento de emisiones durante los fines de semana), en razón de que en el

Parra, R. (2017) Efecto Fin de Semana en la calidad del aire de la ciudad de Cuenca, Ecuador. ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, http://doi.org/10.18272/aci.v9i15.291

Centro Histórico de Cuenca no hay una fuente relevante de los precursores de O_3 cuyas emisiones se incrementen durante los fines de semana.

Los resultados sugieren que en el Centro Histórico de Cuenca, al haber potencialmente un régimen limitado por COV, la producción de O_3 podría controlarse reduciendo las emisiones de COV. La simulación numérica, por medio de un modelo euleriano de transporte químico, puede ser utilizada para cuantificar el aporte de la hipótesis del EFS en la Ciudad de Cuenca, y con ello evaluar la efectividad de las alternativas para controlar la generación de O_3.

AGRADECIMIENTOS

A la Ing. Claudia Espinoza, de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Cuenca, por la entrega de la información.

REFERENCIAS

[1] Jacobson, M. (2002). *Atmospheric Pollution: History, science and regulation*. New York: Cambridge University Press.

[2] CARB. (2003). *The ozone weekend effect in California*. *Staff Report*. Sacramento: The Planning and Technical Support Division, The Research Division, Air Resources Board, California Environmental Protection Agency.

[3]. NRC (1999). *Ozone-Forming Potential of Reformulated Gasoline*. Washington D.C.: National Academic Press. doi: https://doi.org/10.17226/9461

[4] NARSTO (2000). *An Assessment of Tropospheric Ozone Pollution – A North American Perspective*. Pasco: NARSTO Management Office (Envair).

[5] Cleveland, W. S., Graedel, T. E., Kleiner, B., Warner, J. L. (1974). Sunday and workday variations in photochemical air pollutants in New Jersey and New York. *Science*, 186, 1037–1038. doi: http://doi.org/10.1126/science.186.4168.1037

[6] Lebron, F. (1975). A comparison of weekend-weekday ozone and hydrocarbon concentrations in the Baltimore-Washington metropolitan area. *Atmospheric Environment*, 9, 861–863. doi: https://doi.org/10.1016/0004-6981(75)90046-3

[7] Altshuler, S. L., Arcado, T. D., Lawson, D. R. (1995). Weekday vs. weekend ambient ozone concentrations: discussion and hypotheses with focus on Northern California. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 45, 967–972. doi: https://doi.org/10.1080/10473289.1995.10467428

[8] Brönnimann, S., Neu, U. (1997). Weekend-weekday differences of near-surface ozone concentrations in Switzerland for different meteorological conditions. *Atmospheric Environment*, 31, 1127–1135. doi: https://doi.org/10.1016/S1352-2310(96)00311-1

[9] Qin, Y, Tonnesen, G. S., Wang, Z. (2004). One-hour and eight-hour average ozone in the California South Coast Air Basin: trends in peaks values and sensitivity to precursors. *Atmospheric Environment*, 38, 2197–2207. doi: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.01.010

[10] Jiménez, P., Parra, R., Gassó, S., Baldasano, J. M. (2005). Modeling the ozone weekend effect in very complex terrains: a case study in the Northeastern Iberian Peninsula. *Atmospheric Environment*, 39, 429–444. doi: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.09.065

[11] EMOV EP. (2014). *Inventario de Emisiones Atmosféricas del cantón Cuenca 2011*. Cuenca: Alcaldía de Cuenca, Red de Monitoreo EMOV EP.

Parra, R. (2017) Efecto Fin de Semana en la calidad del aire de la ciudad de Cuenca, Ecuador. ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, http://doi.org/10.18272/aci.v9i15.291

[12] EMOV EP (2014). *Informe de calidad del aire Cuenca 2013*. Cuenca: Alcaldía de Cuenca, Red de Monitoreo EMOV EP.
[13] EMOV EP (2015). *Informe de calidad del aire Cuenca 2014*. Cuenca: Alcaldía de Cuenca, Red de Monitoreo EMOV EP.
[14] EMOV EP (2016). *Informe de calidad del aire Cuenca 2015*. Cuenca: Alcaldía de Cuenca, Red de Monitoreo EMOV EP.
[15] Seguel, R., Morales, S., Leiva, M. (2012). Ozone weekend effect in Santiago, Chile. *Environmental Pollution*, 162, 72–79. doi: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.10.019
[16] Parra, R., Franco, E. (2016). *Identifying the Ozone Weekend Effect in the air quality of the northern Andean region of Ecuador*. *WIT Transaction on Ecology and the Environment*, 207, 169–180. doi: http://www.doi.org/10.2495/AIR160161

Tabla 1: Número de días con excedencias de la Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire para el O_3 (100 μg/m^3, concentración máxima octohoraria) en la ciudad de Cuenca durante los años 2013, 2014 y 2015 [12, 13, 14].

Año	Días laborables	Fines de semana	Total
2013	8	5	13
2014	-	-	-
2015	1	1	2
Total	9	6	15

Este artículo ha sido aceptado luego de una revisión por pares completa, ha pasado por revisión de estilo pero aún no por maquetación y paginación. Por favor, cite este artículo como:

This article has been accepted for publication and undergone full peer review, it has been through copyediting, but not through typesetting and pagination. Please cite this article as:

Parra, R. (2017) Efecto Fin de Semana en la calidad del aire de la ciudad de Cuenca, Ecuador. ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, http://doi.org/10.18272/aci.v9i15.291

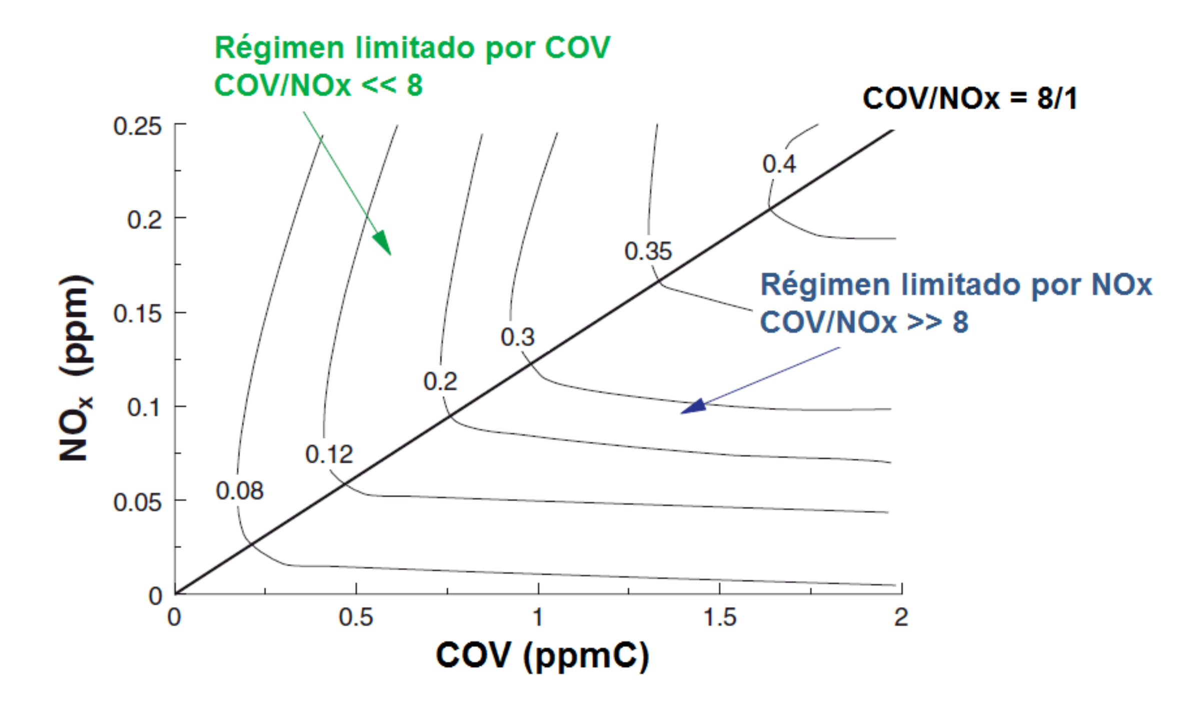


Figura 1: Isopletas de concentraciones máximas horarias de O_3 (ppm) obtenidas en función de diferentes concentraciones iniciales de NO_x y COV; y regiones que corresponden a regímenes de generación de O_3 (limitados por COV o NO_x). Adaptado de NRC [3].

ARTÍCULO ACEPTADO / ACCEPTED PAPER
Este artículo ha sido aceptado luego de una revisión por pares completa, ha pasado por revisión de estilo pero aún no por maquetación y paginación. Por favor, cite este artículo como:
This article has been accepted for publication and undergone full peer review, it has been through copyediting, but not through typesetting and pagination. Please cite this article as:

Parra, R. (2017) Efecto Fin de Semana en la calidad del aire de la ciudad de Cuenca, Ecuador. ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, http://doi.org/10.18272/aci.v9i15.291

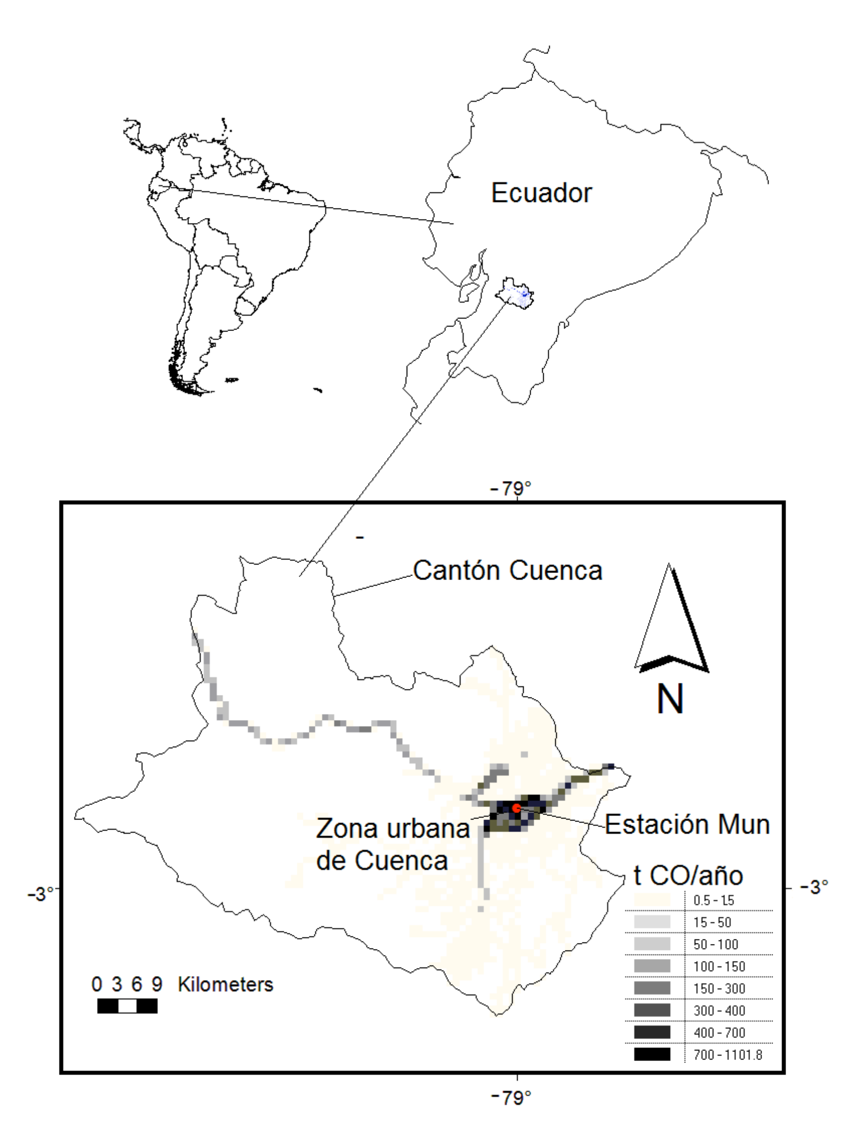


Figura 2: Ubicación de la ciudad de Cuenca y de la estación de calidad del aire localizada en el centro histórico (Estación Mun). Los colores en gris indican la intensidad de las emisiones de CO (t/a), según el inventario de emisiones atmosféricas del año 2011 [11].

Parra, R. (2017) Efecto Fin de Semana en la calidad del aire de la ciudad de Cuenca, Ecuador. ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, http://doi.org/10.18272/aci.v9i15.291

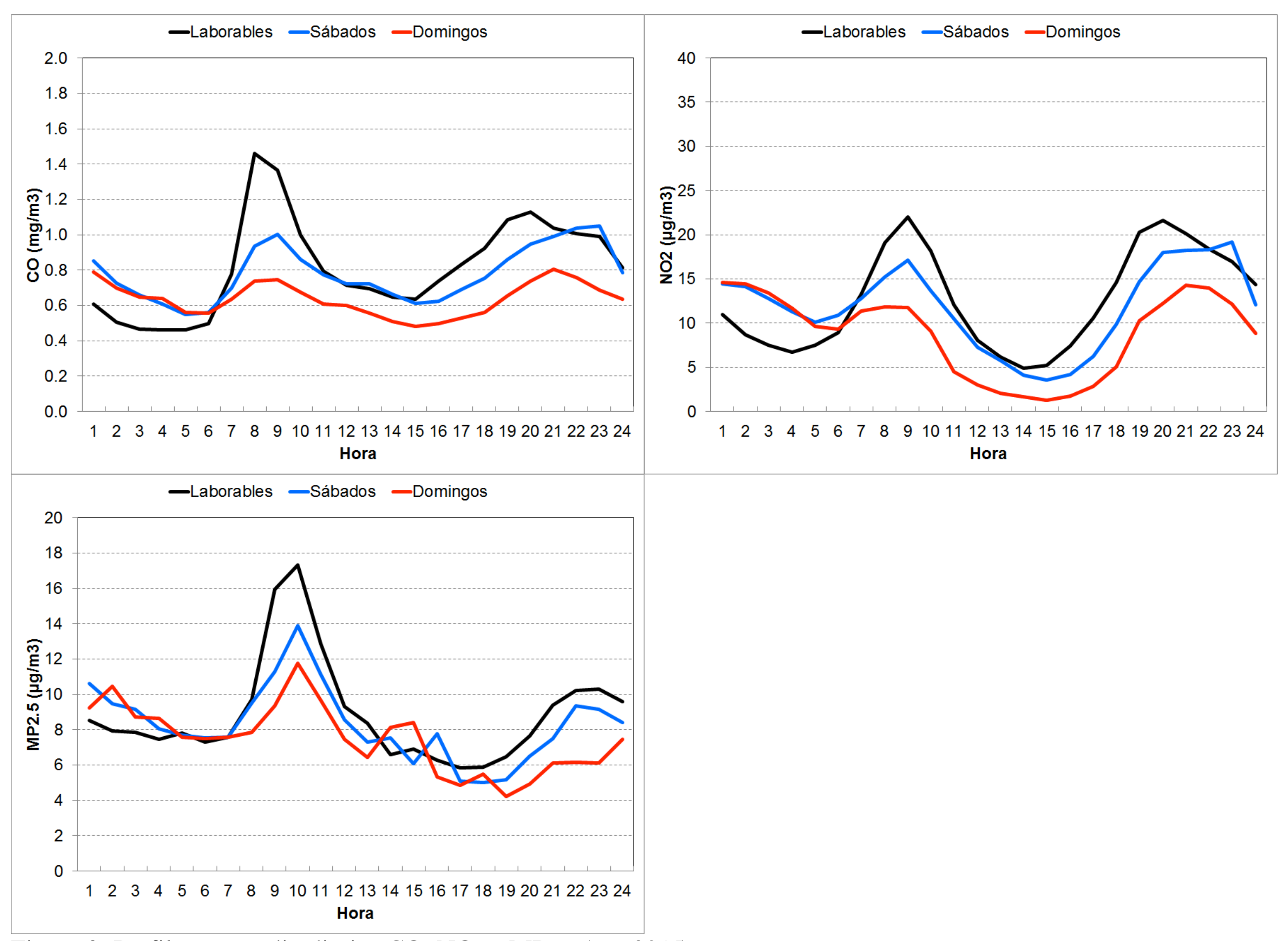


Figura 3: Perfiles promedio diarios CO, NO_2 y $MP_{2.5}$. Año 2015.

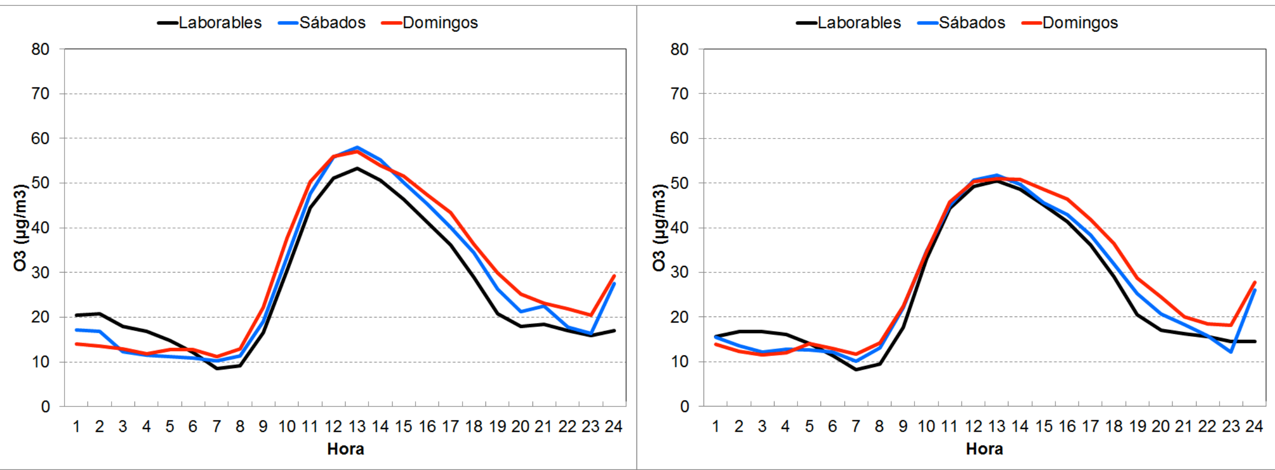


Figura 4: Perfiles promedio diarios O_3. Años 2013, 2014 y 2015.

Parra, R. (2017) Efecto Fin de Semana en la calidad del aire de la ciudad de Cuenca, Ecuador. ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, http://doi.org/10.18272/aci.v9i15.291

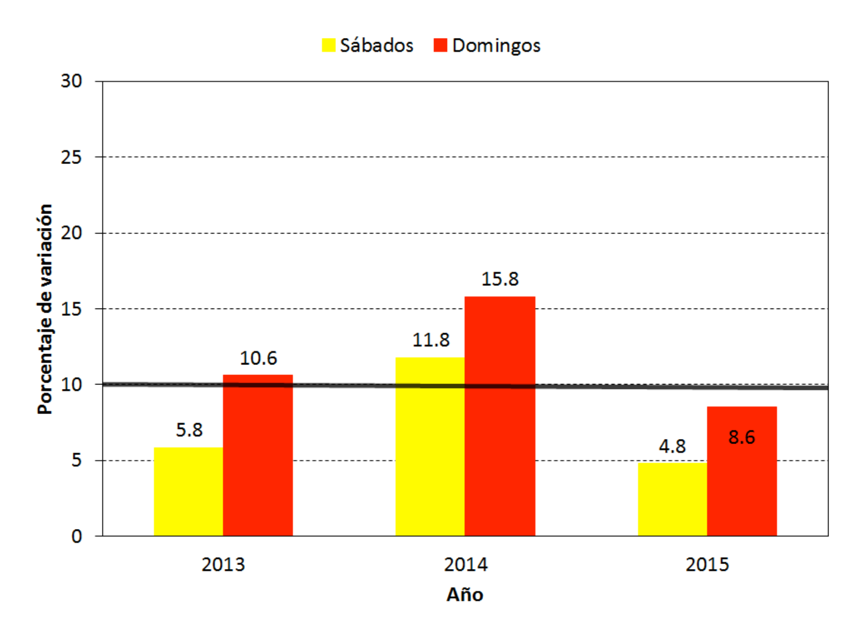


Figura 5: Variación media de las concentraciones octohorarias máximas de O_3 entre sábados y domingos con respecto a los días laborables.